Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 6, Feb.-Mar., 2023, p. 677-693

Evaluating the Effect of Combined Water and Salinity Stresses in Estimating the Fodder Maize Biological Yield through Periodic Evaporation and Transpiration

F. Zargar Yaghoubi[1], M. Sarai Tabrizi[2*], A. Mohammadi Torkashvand[3], M. Esfandiari[4], H. Ramezani Etedali[5]

Received: 23-07-2022 Revised: 01-11-2022 Accepted: 30-11-2022 Available Online: 27-02-2023	**How to cite this article:** Zargar Yaghoubi, F., Sarai Tabrizi, M., Mohammadi Torkashvand, A., Esfandiari, M., & Ramezani Etedali, H. (2023). Evaluating the Effect of Combined Water and Salinity Stresses in Estimating the Fodder Maize Biological Yield through Periodic Evaporation and Transpiration. *Journal of Water and Soil 36*(6): 677-693. (In Persian with English abstract) **DOI:** 10.22067/jsw.2022.77735.1183

Introduction

The rise in water demand and reduction of water quality and soil in irrigating areas, especially in dry and semi-arid areas of the world, have turned into one of the most crucial challenges for water and soil engineering in recent years. This issue leads us toward optimal quantitative and qualitative management of these valuable resources aimed at achieving economic performance and water productivity. The periodic evaporation and transpiration of the plant in the conditions of simultaneous water and salinity stress are known as one of the most important factors in the qualitative and quantitative growth of the plant yield. Applying mathematical models that simulate the relationship between field variables and yield can be seen as a useful tool in water and soil management issues in such a situation, which has the potential to ensure optimal use of the water and soil resources of any country by providing the plant's water needs and preventing its further loss.

Materials and Methods

A factorial experiment was performed in 2019 based on completely randomized blocks design with three replications in plots with an area of 9 square meters at the agricultural and animal husbandry farm of Aliabad Fashafuyeh, located in Qom province to examine the simultaneous effect of different levels of water stress and salinity on the periodic evaporation-transpiration and fresh yield of the single cross 704 forage corn cultivar. The applied treatments included the irrigation water salinity at three electrical conductivity levels of 1.8 (S_0), 5.2 (S_1), and 8.6 (S_2) deci Siemens/meter (dS/m), which were prepared by mixing saline well water of the region with fresh (drinking) water and three water stress levels of 100% (W_0), 75% (W_1), and 50% (W_2) of the plant's water requirement. The depth of soil moisture in the corn plant root zone was measured by the TDR device at five depths of 7.5, 12, 20, 40, and 60 cm during different growth stages of the plant using pairs of 7.5, 12, and 20 cm stainless steel electrodes.

Results and Discussion

The simultaneous water and salinity stresses, which led to the reduced amount of periodic evaporation-transpiration of the yield compared to ideal conditions (without stress), were simulated by additive and multiplicative models. The results suggested a decrease in the evaporation and transpiration with the increased

1, 3 and 4- Ph.D. Student of Soil Engineering and Sciences, Associate Professor and Assistant Professor, Department of Soil Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, respectively.
2- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: m.sarai@srbiau.ac.ir)
5- Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

simultaneous water and salinity stresses so that the amount of total evaporation-transpiration in different treatments was measured to be between 692.7 and 344.9 mm and the fresh yield was estimated between 50.4 and 3.2 tons per hectare. Also, the highest amount of periodic evaporation and transpiration in all treatments was found to occur in the development and intermediate stages, and the relative fresh yield in the W_0S_0 to W_2S_2 treatments was calculated between 66% and 100%. The results of modeling the relative yield of the crop based on the amounts of relative evaporation and transpiration of corn in different growth stages and under the different treatments of water stress and salinity, indicated that Singh's additive model and Rao's multiplicative model were appropriate, while the Minhas model was recognized to be inappropriate in this estimation.

Conclusion

The research results suggested the significant impact of water stress and salinity at least at the 95% level on evaporation and transpiration and the corn yield. Moreover, the effect of the sensitivity of different growth stages of the plant on the reduction of evaporation and transpiration of corn varies so that in the three treatment groups W_0, W_1, and W_2, the highest average decrease in slope was related to the final stage (13.6%) followed by the middle stage with an average decrease of 8.4% compared to the control treatment. Therefore, the highest decrease rate in evaporation-transpiration slope has been observed in these two growth stages due to the beginning of flowering, fruit formation, and physiological ripening of seeds. These results come from the lack of sufficient water storage and increased salinity of irrigation water in the soil. Water stresses and salinity will reduce water absorption and evaporation-transpiration, and ultimately, reduce crop production due to the decreased amount and potential of water in the soil. Another finding to be mentioned is the priority of water stress compared to salinity stress in reducing evaporation and transpiration and production yield. Also, by managing water and salinity stresses in the critical stages of plant growth (especially the middle stage), which is the time of flowering and the beginning and completion of the maize production process, a significant reduction in the crop can be somewhat prevented.

Keywords: Experimental models, Relative evaporation-transpiration, Relative performance, Simultaneous stress, TDR

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۶۹۳-۶۷۷

ارزیابی اثر تنش‌های توأمان آبی و شوری در برآورد عملکرد بیولوژیکی ذرت علوفه‌ای از طریق تبخیر و تعرق دوره‌ای

فرامرز زرگر یعقوبی[۱]- مهدی سرائی تبریزی[۲*]- علی محمدی ترکاشوند[۳]- مهرداد اسفندیاری[٤]- هادی رمضانی اعتدالی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹

چکیده

تأثیر توأمان کمّیت و کیفیت آب آبیاری در شرایط غالب مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله چالش‌های مهم بخش کشاورزی در کاهش میزان تبخیر-تعرق گیاه و تولید محصول نهایی می‌باشد. به‌منظور بررسی اثر هم‌زمان سطوح مختلف تنش آبی و شوری بر تبخیر و تعرق دوره‌ای و عملکرد تر ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل (3^2) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در کرت‌های به مساحت ۹ مترمربع در مزرعه کشاورزی و دامپروری علی‌آباد فشافویه واقع در استان قم در سال ۱۳۹۹ اجرا گردید. تیمارهای اعمال شده شامل شوری آب آبیاری در سه سطح هدایت الکتریکی ۱/۸ (S_0)، ۵/۲ (S_1) و ۸/۶ dS/m (S_2) که از طریق اختلاط آب چاه شور منطقه با آب شیرین تهیه و تنش آبی نیز در سه سطح به‌ترتیب شامل ۱۰۰٪ (W_0)، ۷۵٪ (W_1) و ۵۰٪ (W_2) نیاز آبی گیاه (کنترل با دستگاه TDR-150) استفاده شد. تبخیر و تعرق کل در تیمارهای مختلف بین ۶۹۲/۷ (W_0S_0) تا ۳۴۴/۹ (W_2S_2) میلی‌متر و عملکرد تر بین ۵۰/۴ تا ۳۳/۲ تن بر هکتار اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بیش‌ترین میزان تبخیر و تعرق دوره‌ای در تمامی تیمارها در مراحل توسعه و میانی صورت گرفته است. به‌طوری‌که میزان تبخیر و تعرق نسبی در مراحل توسعه، میانی و پایانی رشد به‌ترتیب بین تیمار شاهد و بقیه تیمارها ۱۰۰-۴۵٪، ۱۰۰-۴۹٪ و ۱۰۰-۴۴٪ برآورد شد. میزان عملکرد نسبی تر نیز در تیمارهای W_0S_0 تا W_2S_2 بین ۱۰۰ تا ۶۶ درصد محاسبه گردید. همچنین نتایج نشان داد که بیش‌ترین کاهش درصد عملکرد بین گروه تیماری W_2 (تیمارهای W_2S_0، W_2S_1 و W_2S_2) برابر با ۱۳/۶ درصد و سپس گروه تیماری W_0 (تیمارهای W_0S_0، W_0S_1 و W_0S_2) برابر با ۱۲ درصد و کم‌ترین آن بین گروه تیماری W_1 (تیمارهای W_1S_0، W_1S_1 و W_1S_2) به میزان ۳ درصد به‌دست آمد. نتایج مدل‌سازی عملکرد نسبی محصول بر اساس مقدار تبخیر و تعرق نسبی ذرت در مراحل مختلف رشدی و در شرایط تیمارهای مختلف تنش‌های آبی و شوری حاکی از مناسب بودن مدل جمع‌پذیر سینگ با ارزیابی‌های آماری EF، R^2 و RMSE به‌ترتیب ۰/۳۶۱، ۰/۸۹۱ و ۰/۰۶۵ و ضرب‌پذیر رائو با آنالیزهای ذکر شده ۳/۱۷۱-، ۰/۹۱۴ و ۰/۱۶۵ بوده و مدل مینهاس نامناسب در این برآورد تشخیص داده شد. بنابراین مدل‌های انتخابی با برآورد مناسب عملکرد نسبت به آب مصرفی علاوه بر تأمین نیاز آبی گیاه موجب کاهش حجم آب آبیاری و هدر رفت آن و استفاده بهینه از منابع آبی کشور می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر- تعرق نسبی، تنش هم‌زمان، عملکرد نسبی، مدل‌های تجربی، TDR

۱، ۳ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک، دانشیار و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: m.sarai@srbiau.ac.ir
۵- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2022.77735.1183

مقدمه

تنش به‌عنوان کاهش رشد کمّی یا کیفی گیاه شناخته شده که در اثر تغییرات خارج از دامنه مطلوب عوامل محیطی، ایجاد می‌شود. دو تنش آبی (خشکی) و شوری از مهم‌ترین تنش‌های غیرزنده محیطی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان می‌باشد. در این شرایط و محدودیت‌ها، برآورد نیاز آبی واقعی گیاه منجر به افزایش بهره‌وری مصرف آب خواهد شد. وجود هر یک از تنش‌های آبی و شوری جذب آب و به تبع آن عملکرد محصول را کاهش و وجود هم‌زمان این دو تنش این کاهش را تشدید می‌کند (Jalali *et al.*, 1999). نتایج پژوهشی با پنج سطح شوری ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵، ۵ و ۷dS/m بر روی بادمجان نشان از کاهش مصرف آب با افزایش شوری می‌دهد (Unlukara *et al.*, 2010). همچنین افزایش هر واحد شوری آب آبیاری در کشت ارکا باعث کاهش ۲/۴۳ درصدی مصرف آب گردید (Unlukara *et al.*, 2008). در تحقیق دیگری بر روی آفتابگردان اثر دو سطح کمبود آب و چهار سطح شوری آب نشان داد که شوری آب باعث کاهش پتانسیل اسمزی خاک (افزایش فشار اسمزی محلول خاک) و کاهش جذب آب گیاه می‌شود (Shi *et al.*, 2020). در پژوهش دیگری بر روی گوجه گیلاسی اثر دو سطح شوری آب آبیاری (۴ و ۷ dS/m) و سه سطح تنش آبی (۴۰، ۵۰ و ۶۵ درصدی تخلیه رطوبتی خاک) نشان از معنی‌دار شدن اثر تنش شوری بر عملکرد، تبخیر- تعرق کل و کارآیی مصرف آب شد و تنش شوری ۷ dS/m موجب کاهش عملکردی ۲۷ درصدی و کاهش کارآیی ۱۹/۲ درصدی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد شده بود (Abdoli *et al.*, 2018). وجود منابع آبی محدود در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده از منابع آبی با کیفیت پائین و لب‌شور را اجتناب ناپذیر می‌کند لذا در کشت آبی گیاهان (فاریاب) از جمله ذرت ارائه راه‌کارهای عملی و پویا برای مدیریت کم‌آبیاری و استفاده از آب‌های نامتعارف اهمّیت بسزایی دارد. از آنجایی که شدّت اثر تنش‌ها در تبخیر–تعرق گیاهان در مراحل مختلف رشدی متفاوت می‌باشد، می‌توان عملکرد محصول را بر اساس آن مدل‌سازی کرد و مدلی تجربی برای آن ارائه نمود. حذف یک مرحله (نوبت) آبیاری در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت رقم سینگل‌کراس۷۰۴ منجر به عملکرد تر به‌ترتیب ۶۸، ۶۲/۲ و ۶۶/۴۷ تن بر هکتار در شاهرود گردید که نشان از اثر بیشینه تنش خشکی در مرحله گل‌دهی بر کاهش عملکرد محصول دارد (Mohammadi, 2017) همچنین اعمال تنش ۵۰ درصدی نیاز آبی ذرت در مرحله رشد رویشی آسیب جبران‌ناپذیری بر عملکرد گیاه در استان فارس وارد آورد و مشخص گردید که مرحله رشد زایشی (گل‌دهی) و اوایل پر شدن دانه حساس‌ترین مرحله به تنش خشکی می‌باشد (Hemati *et al.*, 2014). افزون بر عملکرد، اعمال یک حد ثابت از تنش آبی در مراحل رشد چهار برگی، دوازده برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه ذرت، تأثیر متفاوتی بر مقدار تبخیر–تعرق گیاه دارد به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار تبخیر–تعرق مربوط به مرحله گل‌دهی است که علّت آن حساسیت بیش‌تر ذرت به تنش خشکی در این مرحله می‌باشد (Saeidi and Sotoudeh Nia, 2021). در پژوهشی دیگر با افزایش تنش شوری در منطقه ریزوسفر، پتانسیل آب موجود در خاک کاهش یافته و جذب آب توسط گیاه کم می‌شود از این رو با کاهش کیفیت آب آبیاری (افزایش شوری از ۰/۵ به ۷/۵ dS/m) مقدار تبخیر–تعرق و عملکرد ذرت به‌ترتیب ۳۱ و۶۰ درصد کاهش یافت (Lacerda *et al.*, 2016). در تحقیقی دیگر در منطقه باجگاه استان فارس طی دو سال ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ نتایج نشان داد که با کاهش مقادیر آب مصرفی ذرت به میزان ۲۵ درصد (I_2) و ۵۰ درصد (I_3) کمتر از مقدار شاهد (I_1=1.25ET_C) مقادیر ET (تبخیر–تعرق)، T (تعرق) و E (تبخیر) در تیمارهای I_2 و I_3 به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به‌میزان (۱۹ و ۴۲ درصد)، (۲۵ و ۴۳ درصد) و (۳ و ۳۹ درصد) کمتر از تیمار شاهد خود(I_1) بودند. همچنین با افزایش شوری از ۰/۶ (S_1 به‌عنوان شاهد) به ۲ (S_2) و ۴ dS/m (S_3) در مقدار ET اختلاف معنی‌داری بین سطوح شوری S_2 و S_3 دیده نشد ولی تعرق (T) به‌ترتیب در S_2 و S_3 به‌مقدار ۵ و ۱۲ درصد کاهش نسبت به S_1 داشته و تبخیر (E) به‌میزان ۱۶ و ۳۳ درصد افزایش نسبت به شاهد خود (S_1) پیدا کرده بود که نشان از تأثیر شوری بر کاهش رشد، اندازه سطح سبز گیاه و ریشه می‌باشد که منجر به کاهش ET و T شده و به‌بیانی دیگر کاهش اندازه سطح سبز گیاه (تاج پوشش) سرانجام به تبخیر بالا از سطح خاک لخت در معرض تابش خورشید شده است (Azizian and Sepaskhah, 2014). بنابراین تنش‌های آبی و شوری هر دو از عوامل محدود کننده جذب آب و تعرق محسوب می‌شوند لیکن باید توجه داشت که اثر زیان‌بار تنش‌های مذکور در مراحل مختلف رشد گیاه متفاوت است از این رو با مدیریت تنش‌ها در مراحل حساس رشد می‌توان تبخیر–تعرق و عملکرد محصولات را در راستای افزایش بهره‌وری مصرف آب مدیریت نمود و در شرایط وجود تنش‌های آبی و شوری، از طریق کمّی نمودن مقدار حساسیت گیاه در مراحل رشد، می‌توان مقدار عملکرد محصول را بر اساس مقدار تبخیر–تعرق گیاه تخمین زد. مدل‌های بِلَنک (Blank, 1975)، اِستوارت (Stewart *et al.*, 1976)، سینگ (Sing *et al.*, 1987)، جِنسِن (Jensen, 1968)، رائو (Rao *et al.*, 1988) و مینهاس (Minhas *et al.*, 1974) برای تخمین عملکرد محصول از روی مقدار تبخیر–تعرق گیاه طی دوره رشد، ارائه شده است. هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای براساس تبخیر–تعرق دوره‌ای در شرایط تنش‌های توأمان آبی و شوری با استفاده از مدل‌های مذکور می‌باشد. با انجام

تحقیق حاضر، حساسیت تبخیر-تعرق ذرت در مراحل مختلف رشد تعیین، و مدلی جامع برای تخمین عملکرد محصول در شرایط تحت تنش معرفی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌منظور اثر برهم‌کنش تنش‌های توأمان آبی (خشکی) و شوری بر تبخیر-تعرق مرحله‌ای و عملکرد تر بیولوژیکی ذرت علوفه‌ای (بیوماس تر) در مزرعه کشاورزی و دامپروری علی‌آباد واقع بخش فشافویه-شهرستان حسن‌آباد قم انجام گردید. منطقه مورد مطالعه در موقعیت جغرافیای ´۴۰ °۱۵ طول شرقی و ´۱۷ °۳۵ عرض شمالی در کویری نسبتاً هموار و مسطح و در ارتفاع ۱۱۹۱ متری از سطح دریا دارای آب و هوای خشک و اصولاً کم‌باران و نسبتاً گرم و زمستان‌های سرد که به‌علت مسطح بودن در معرض وزش‌های بادی غیرموسمی قرار گرفته است. حداکثر دما در فصل تابستان ۴۲ درجه و حداقل در زمستان ۴- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. الگوی کشت مرسوم در منطقه گندم و جو پائیزه، یونجه و ذرت بوده که بسیاری از کشاورزان از این الگو استفاده می‌کنند. گیاه مورد مطالعه، ذرت علوفه‌ای (رقم SC. ۷۰۴) که به‌صورت جوی پشته‌ای در کرت‌های مربعی شکل به ابعاد ۳ در ۳ متر با فاصله سه متر از هم از هر چهار طرف (ناحیه پیاده رو) در اواسط تیرماه ۱۳۹۹ کاشته شد. بذرها با حداقل خلوص و قوه‌نامیه به‌ترتیب ۹۸٪ و ۹۵٪ روی ردیف‌های کشت با فاصله ۲۵ سانتی‌متری و عمق ۵ تا ۷ سانتی‌متری و فاصله پشته‌ها از هم ۶۰ سانتی‌متر درنظر گرفته شد. عوامل اصلی آزمایش شامل سه سطح آبیاری (با نماد W) و سه سطح شوری (با نماد S) با سه تکرار در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی[1] (RCBD) و به‌صورت آزمایش فاکتوریل ۳[2] در ۲۷ واحد آزمایشی (کرت) انجام شد. سطوح آبیاری شامل W_0 (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه)، W_1 (تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه) و W_2 (تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) که توسط دستگاه TDR مدل ۱۵۰ همواره کنترول گردید و سطوح شوری عبارتند از S_0 (با هدایت الکتریکی ۱/۸ dS/m)، S_1 (با هدایت الکتریکی ۵/۲ dS/m) و S_2 (با هدایت الکتریکی ۸/۶ dS/m) که از طریق اختلاط آب چاه شور منطقه (کلاس آبیاری ویلوکس C_5S_4) با آب شیرین (شرب) تأمین گردید. جهت بررسی خاک مزرعه آزمایشی در سه عمق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری نمونه‌های مرکبی برداشت گردید به‌گونه‌ای که معرف کل مزرعه و تغییرات خاک باشد. آنالیز شیمیایی و فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

مقادیر کود شیمیایی اصلی ماکرو براساس نتایج تجزیه شیمیایی خاک محل آزمایش به‌میزان ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن (اوره)، ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم در آزمایش طرح اعمال گردید. تمام کودهای سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم در یک مرحله به‌صورت یکنواخت و قبل از کاشت در سطح کرت‌های مربوطه پخش گردید و به‌طور کامل با خاک مخلوط شدند. کود نیتروژن از منبع اوره در سه مرحله، یک سوم نیتروژن مورد نیاز را هم‌زمان با کاشت به صورت نواری در ۵ سانتی‌متری زیر و کنار بذر به زمین داده شد و بقیه آن (دو سوم کود باقیمانده) در دو مرحله به‌طور مساوی در زمان تُنک کردن و مرحله ظهور گل‌تاجی به خاک اضافه گردید. با توجه به شرایط مزرعه و میزان رشد ریشه ذرت، حداکثر عمق نمونه‌برداری ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. ریشه ذرت اکثراً تا عمق ۶۰ سانتی‌متری گسترش می‌یابد و ۹۰ درصد حجم توسعه آن تا عمق ۴۰ سانتی‌متری است. با توجه به هدف برداشت علوفه ذرت تاریخ کاشت و برداشت ۱۳۹۹/۴/۱۶ و ۱۳۹۹/۹/۳ و دوره رشد گیاه حدود ۱۴۰ روز در نظر گرفته شد. طول دوره رشد مربوط به زمان کاشت، داشت و برداشت محصول در پژوهش حاضر براساس گزارش فائو ۵۶ که مراحل رشدی گیاه را به چهار دوره اوّلیه[2] (۲۵ روز)، توسعه[3] (۴۰ روز)، میانی[4] (۴۵ روز) و پایانی[5] (۳۰ روز) تقسیم می‌کند تطبیق داده شد. برای تمامی تیمارها در طول دوره اوّلیه رشد (از زمان کاشت تا مرحله ۵ تا ۸ برگی) ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در هر کرت تأمین گردید و هیچ‌گونه تنشی در این مرحله اوّلیه داده نشد و شروع تنش‌های آبی و شوری در بعد از این مرحله اعمال گردید. تیمارهای شوری بر اساس اختلاط آب چاه شور منطقه با آب شیرین (شرب) توسط روابط زیر نسبت به تعیین حجم آب‌های شور و شیرین اقدام گردید و قبل از هر نوبت آبیاری در مخازن پلاستیکی PVC تهیه و با کنترول مجدد هدایت الکتریکی توسط ECسنج پُرتابل مورد تست قرار گرفت.

$$EC_f = \frac{EC_w \times V_w + EC_s \times V_s}{V_w + V_s} \quad (1)$$

$$V_t = V_w + V_s \quad (2)$$

که در آن EC_f هدایت الکتریکی نهایی (dS/m)، EC_w هدایت الکتریکی آب چاه شور (dS/m)، EC_s هدایت الکتریکی آب شیرین (شرب) (dS/m)، V_w حجم آب شور چاه (lit)، V_s حجم آب شیرین (شرب) (lit)، V_t حجم آب کل (lit) که به هدایت الکتریکی نهایی (سطوح شوری مورد تحقیق) رسیده است، می‌باشد.

1- Completely Random Block Design

2- Initial Stage
3- Development Stage
4- Middle Stage
5- Final Stage

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک منطقه مورد آزمایش

Table 1- Some physicochemical properties of the soil at experiment site

عمق Depth (cm)	شوری EC ($dS.m^{-1}$)	اسیدیته pH	آهک TNV (%)	کربن آلی OC (%)	ازت کل Total N ($mg.kg^{-1}$)	فسفر P (mean) ($mg.kg^{-1}$)	پتاسیم K (mean) ($mg.kg^{-1}$)	رطوبت حجمی FC ($cm^3.cm^{-3}$)	رطوبت حجمی PWP ($cm^3.cm^{-3}$)	بافت خاک Texture
0-20	8.67	7.86	14.18	0.61	627.8	5.65	197.30	29.8	14.7	Loam
20-40	7.96	7.88	12.35	0.58	582.0	5.38	181.37	28.5	15.1	Loam
40-60	8.42	7.94	13.11	0.53	561.2	4.93	168.02	35.6	18.4	Clay loam

داده‌های پژوهش شامل مقادیر تبخیر–تعرق در هر مرحله مختلف دوره رشدی ذرت (۴ مرحله) و عملکرد نهایی بیولوژیکی تر بود که تجزیه واریانس و مقایسه میانگین آن‌ها به‌روش توکی در سطح احتمال خطای ۵ درصد توسط نرم‌افزار SAS 5.4[1] انجام شد. سپس داده‌های آنالیز شده به‌صورت شکل و جدول تدوین و به دقّت تفسیر شده است.

اندازه‌گیری تبخیر و تعرق

اندازه‌گیری رطوبت عمق خاک منطقه ریشه ذرت توسط دستگاه بازتاب زمانی امواج[2] TDR-150 (ساخت شرکت Spectrum امریکا) در پنج عمق ۷/۵، ۱۲، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری (توسط پروب‌های فولادی ضد زنگ ۷/۵، ۱۲ و ۲۰ سانتی‌متری) در مراحل مختلف طول دوره رشد گیاه توسط جفت الکترودهای فولادی مخصوص دستگاه به‌صورت حجمی اندازه‌گیری شد. در ابتدا قبل از کاشت بذرها، دستگاه TDR توسط خاک محل کشت کالیبره گردید. به این صورت که برای هر نمونه رطوبت واقعی خاک از حدّ اشباع تا خشک یک مقدار توسط دستگاه ثبت گردید و سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه تعیین رطوبت شدند و در نهایت یک برازش بین اعداد قرائت شده توسط دستگاه (محور Xها) و اعداد رطوبت واقعی خاک (محور Yها) داده شد. از این‌رو یک خط با معادله مشخص و ضریب همبستگی بالا (R^2=0/96) بین داده‌ها برازش شد که از آن برای تبدیل داده‌های دستگاه به داده‌های واقعی (رطوبت حجمی خاک) استفاده گردید. از آنجایی که در طول زمان کاشت، داشت و برداشت (فصل تابستان) هیچ‌گونه ریزش جوی در منطقه نازل نشده بود این فرصت مهیا گردید که از طریق پایش روزانه رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه (رطوبت تعیین شده توسط دستگاه TDR) و محاسبه بیلان آب در فاصله بین دو آبیاری، امکان برآورد مقدار تبخیر و تعرق روزانه توسط رابطه زیر، وجود داشت.

$$d_{H_2O} = \sum_{i=1}^{n} \left[(\theta_{FC} - \theta_i)/100 \right] \times D_i \times C_{WS} \qquad (۳)$$

که در آن، d_{H_2O} عمق آب آبیاری مورد نیاز (cm)، θ_{FC} رطوبت حجمی ظرفیت زراعی خاک (cm^3/cm^3)، θ_i رطوبت حجمی لایه i ام خاک (cm^3/cm^3)، D_i عمق ضخامت لایه i ام خاک (cm) و C_{WS} ضریب تنش آبی (مقدار آن با توجه به میزان تنش آبی طرح ۱، ۰/۷۵و یا ۰/۵) می‌باشد.

تعیین زمان و حجم آب آبیاری

با توجه به پایش هر روزه کرت‌ها (۲۷ کرت) و اعمال تنش‌های آبی W_0 (۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه)، W_1 (۷۵٪ نیاز آبی گیاه) و W_2 (۵۰٪ نیاز آبی گیاه)، زمان انجام آبیاری با استفاده از دستگاه بازتاب زمانی امواج محاسبه گردید. این زمان در گروه تیماری W_0 (تیمارهای W_0S_0، W_0S_1 وW_0S_2) مصرف صفر درصد آب سهل‌الوصول می‌باشد یعنی آن‌که همواره این سه سری کرت‌ها به‌همراه تکرارهایشان دچار تنش آبی نشده و همواره در تمامی دوره‌های رشدی خود تنشی از بابت آب آبیاری نداشته‌اند و فقط بین این سه ترکیب تیماری تنش‌های شوری S_0 (۱/۸ dS/m)، S_1 (۵/۲ dS/m) و S_2 (۸/۶ dS/m) اعمال شده و در گروه تیماری W_1 (تیمارهای W_1S_0، W_1S_1 و W_1S_2) شروع زمان آبیاری اتمام مصرف شدن ۲۵ درصدی آب سهل‌الوصول در دوره‌های رشدی توسعه، میانی و پایانی است و اختلاف بین این سه گروه ترکیب تیماری، تنش‌های شوری S_0، S_1 و S_2 می‌باشد و در نهایت، در گروه تیماری W_2 (تیمارهای W_2S_0، W_2S_1 وW_2S_2) شروع زمان آبیاری مصرف شدن ۵۰ درصد آب سهل‌الوصول در سه دوره رشدی توسعه، میانی و پایانی است و باز هم اختلاف بین این تیمارها از نظر تنش شوری S_0، S_1 و S_2 می‌باشد. در تمامی ترکیبات تیماری ذکر شده (از W_0S_0 تا W_2S_2) در دوره رشد اوّلیه گیاه، هیچ‌گونه تنشی از بابت شوری و یا خشکی (آبی) به گیاه داده نشده بود. آب سهل‌الوصول[3] (RAW) کسری از رطوبت بین حدّ ظرفیت مزرعه‌ای[4] (FC) و نقطه پژمردگی دائم[5] (PWP) است که با کاهش رطوبت خاک نسبت به حد RAW، گیاه وارد فاز تنش آبی می‌شود. حجم آب لازم برای کرت‌ها با توجه به چهار مرحله

1- Statistical Analysis System
2- Time Domain Reflectometry

3- Readily Available Water
4- Field Capacity
5- Permanent Wilting Point

دوره رشدی گیاه و به تبع آن توسعه عمق مؤثر ریشه ذرت و مساحت کرت‌ها از رابطه زیر تعیین گردید.

$$V_{H_2O} = d_{H_2O} \times A \qquad (۴)$$

کـه در آن، V_{H_2O} حجـم آب لازم بـرای انـواع تیمـارهـا کـه در کرت‌های مختلف هستند (m^3)، d_{H_2O} عمق آب آبیاری مورد نیاز (m) و A مساحت کرت (m^2) می‌باشد.

در نهایت، متوسط عمق توسعه ریشـه ذرت را ۶۰ سـانتی‌متـر در نظر گرفته شد که با پایان رسیدن دوره رشد گیاه و برداشت محصـول و حفر گودال در خاک کرت‌ها بقایای ریشه ذرت در اعماق بیش‌تـر از ۶۰ سانتی‌متری مشاهده نشد. از طرفی با فرض کوچک بودن کرت‌ها ($۹m^2$) و نبود درز و ترک در اعماق خاک و یا جریان‌های ترجیحی در آن، اطمینان حاصل شد که روند کاهش مقدار رطوبت خـاک (منطقـه ریشه) در روزهای پس از آبیاری، صرفاً متأثر از فرآیند تبجیـر و تعـرق بوده است. برای آبیاری کرت‌ها، آب از مخازن تیمـارهـا (بشـکه‌هـای PVC) توسط شلنگ و به‌صورت غرقابی و با جریان آرام به کـرت‌هـا داده شد. آبیاری به‌شکل یکنواخت در سطح هر کرت توزیـع گردیـد و با توجه به کوچکی کرت و میزان دقیق برآورد حجم آب برای منطقـه ریشه و محصور بودن کرت‌ها توسط پشته‌هـا و عـدم ایجـاد روانـآب، راندمان کاربرد آبیاری صد در صد در نظر گرفته شد.

معرفی مدل‌های کاربردی

تنش آبی و شوری آب آبیـاری هـر دو منجـر بـه کـاهش مقـدار تبخیر-تعرق و عملکرد تولید نسبت به شرایط ایـده‌آل (بـدون تـنش) می‌شود. در این پژوهش، رابطه بین عملکرد و تبخیـر-تعـرق ذرت در طی مراحل رشدی و در شرایط تنش دوگانه آبی و شوری مدل‌سـازی شد. متغیرهای وابسطه و مسـتقل بـه‌ترتیـب، عملکـرد نسـبی ($\frac{Y_s}{Y_m}$) و تبخیر-تعرق نسبی در مراحل چهارگانـه رشـدی ذرت ($\frac{ET_{si}}{ET_{mi}}$) درنظـر گرفته شد. برای این منظور مـدل‌هـای جمـع‌پـذیر بِلَنـک، اِسـتوارت، سینگ و مدل‌های ضرب‌پذیر جِنسِن، رائـو و مینهـاس مـورد اسـتفاده قرار گرفتند. مدل‌های ذکر شـده بـه‌ترتیـب در روابـط ۵ تـا ۱۰ آورده شده‌اند. با استفاده از مقادیر تبخیر و تعرق نسـبی در مراحـل مختلـف رشدی و عملکرد ذرت علوفه‌ای، ضرایب مربوط به هر دوره رشدی در شرایط تـنش آبـی و شـوری بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار SPSS[۱] بـرای مدل‌های مختلف برآورد شد. جهت مدل‌سازی دقیـق، ضـرایب گفتـه شده به‌طور مجزا در سطوح مختلف تـنش آبـی و شـوری آب آبیـاری تعیین شدند. همچنین با استفاده از معادلات آماری، مقایسه مدل‌هـای مختلف با یک‌دیگر انجام گردید.

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^{n} a_i \left(\frac{ET_{si}}{ET_{mi}}\right) \qquad (۵)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^{n} a_i \left(\frac{ET_{si}}{ET_{mi}}\right) \qquad (۶)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^{n} a_i \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}}\right)^2\right) \qquad (۷)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{ET_{si}}{ET_{mi}}\right)^{a_i} \qquad (۸)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n} \left[1 - a_i \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}}\right)\right] \qquad (۹)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n} \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}}\right)^2\right)^{a_i} \qquad (۱۰)$$

که Y_s عملکرد در تیمارهای مختلف تحـت تـنش آبـی و شـوری (ton/hec)، Y_m بیشینه عملکـرد در تیمـار شـاهد W_0S_0 (ton/hec)، ET_{si} تبخیر-تعرق در تیمارهای مختلف تحت تنش در دوره iام رشـد خود (mm) و ET_{mi} تبخیر-تعرق حداکثر ذرت در تیمار شـاهد W_0S_0 در دوره رشدی iام و n تعداد مراحل رشدی ذرت که برابر ۴ اسـت، در نظر گرفته شد. جهت سادگی در کاربرد تمامی مـدل‌هـای شـش‌گانـه فوق‌الذکر a_i ضرایب حساسیت هر مدل در دوره رشـدی iام خـود آن مدل می‌باشد. به‌طوری‌که مثلاً a_4 در مدل بِلَنـک ضـریب حساسـیت مرحله پایـانی رشـدی ($i = 4$) در مـدل بِلَنـک اسـت. بـا اسـتفاده از داده‌های تبخیر-تعـرق واقعـی ذرت در منطقـه مطالعـاتی در مراحـل چهارگانه رشدی، عملکرد نسبی ذرت با این مدل‌ها برآورد شد. سـپس مقادیر برآورد شده (پیش‌بینی شده) با مقادیر واقعی عملکرد نسـبی بـا هم مقایسه شدند. برای مقایسه مدل‌هـا بـا هـم از روابـط شـش‌گانـه صحّت‌سنجی و تحلیل حسّاسیت مدل‌های تجربی و نظری که امروزه ملاک سنجش انواع مدل‌های متداول در علوم خاک و آب در کارهای پژوهشی است، مورد ارزیابی قرار گرفتند. معادلات فوق با شماره‌هـای

1- Statistical Package for the Social Sciences

۱۱ تا ۱۶ به ترتیب به‌نام‌های بیشینه خطا[1] (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا[2] ($RMSE$)، ضریب تبیین[3] یا CD (R^2)، ضریب تبیین تعدیل شده[4] (R_{adj}^2)، کارآیی مدل[5] (EF) و ضریب جرمی باقی‌مانده[6] (CRM) مشخص شده‌اند.

$$ME = \max|P_i - O_i| \qquad (۱۱)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۲)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O}).(P_i - \bar{P})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2.\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2} \qquad (۱۳)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1-R^2).(n-1)}{n-t-1} \qquad (۱۴)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \qquad (۱۵)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n}O_i - \sum_{i=1}^{n}P_i}{\sum_{i=1}^{n}O_i} \qquad (۱۶)$$

هر مدلی که مقدار $RMSE$، ME و CRM آن به صفر نزدیک‌تر بود و یا مقدار R^2، R_{adj}^2 و EF آن به یک نزدیک‌تر باشد به‌عنوان مدل بهینه انتخاب می‌شود. حرف O و P به‌ترتیب داده‌های مشاهده‌ای (واقعی) و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها هستند. n تعداد تیمارها و t تعداد فاکتورها یا عوامل بررسی شده (تنش‌های آبی و شوری) در این تحقیق بودند.

نتایج و بحث

تأثیر تیمارها بر تبخیر-تعرق واقعی (mm) و تبخیر-تعرق نسبی (٪)

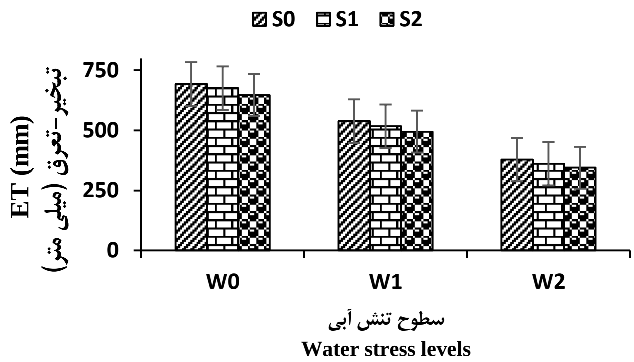
نتایج پژوهش سال زراعی ۱۳۹۹ در منطقه مورد مطالعه نشان داد که تنش آبی و شوری باعث کاهش مقدار تبخیر و تعرق ذرت نسبت به شرایط ایده‌آل (تیمار W_0S_0) گردیده به‌طوری‌که میانگین تبخیر و تعرق از W_0S_0 تا W_2S_2 به میزان ۳۴۸ میلی‌متر یا ۵۰/۲ ٪ کاهش نشان داد که مؤید کاهش جذب آب توسط گیاه و اثر افزایش شوری آب آبیاری بر کاهش تبخیر و تعرق گیاهی است. شکل ۱ روند تبخیر و تعرق واقعی و نسبی را در تیمارهای مورد مطالعه نشان می‌دهد.

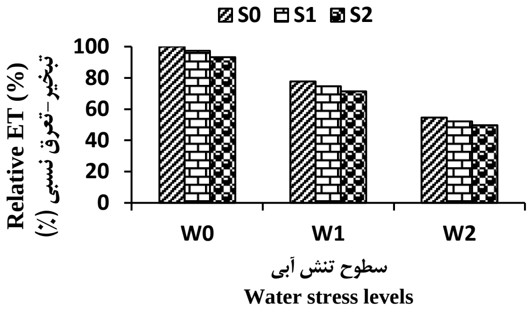
نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین طرح در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داد که مقادیر ET در مرحله ابتدای یا اوّلیه رشد به‌ترتیب از کم‌ترین تا بیش‌ترین تنش آبی و شوری در فاصله ۵۴/۳ تا ۴۹/۲ میلی‌متر کاهش یافته (کاهش ۹/۴ درصدی) و از نظر آماری به دو گروه قابل تقسیم می‌باشد (گروه تیماری W_0 و گروه‌های تیماری W_1 و W_2). در این مرحله با وجودی که تنشی از نظر آبی و شوری داده نشده بود ولی تنش آبی در سطح خطای یک درصد معنی‌دار شده بود (که علت آن را می‌توان خطای انسانی و یا وزش بادهای منطقه‌ای در آن زمان دانست) با این وجود یک میزان تفاوت ۵ میلی‌متری بین حداقل و حداکثر تبخیر-تعرق در این مرحله مشاهده گردید. و اثر تنش شوری و اثر متقابل این دو تنش (آبی و شوری) معنی‌دار نشده بود. در مرحله دوّم یا توسعه، تبخیر و تعرق از تیمار شاهد تا W_2S_2 به میزان ۱۲۷/۴ میلی‌متر کاهش و دو ترکیب تیماری W_2S_1 و W_2S_2 تفاوتی از نظر آماری برای ET نداشتند و سایر ترکیبات تیماری (۷ ترکیب تیماری دیگر) در گروه‌های متفاوتی از این حیث قرار گرفته‌اند. همچنین در این مرحله تنش آبی و شوری در سطح احتمال ۹۹ درصد بر مقادیر ET مؤثر بوده است لیکن اثر متقابل این دو تنش غیر معنی‌دار شده است. در مرحله میانی یا سوّم رشد، تبخیر و تعرق از تیمار شاهد تا W_2S_2 به میزان ۵۱ درصد کاهش یافته و تمام ترکیبات تیماری در گروه‌های متفاوتی قرار می‌گیرند و تنها در این مرحله اثر متقابل تنش‌های آبی و شوری در سطح احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار شده است. بیش‌ترین کاهش ET از W_0S_0 تا W_2S_2 در مرحله پایانی به مقدار ۵۶ درصد اتفاق افتاده است که نشان از تأثیر زیاد اثر تنش‌های هم‌زمان دوگانه آبی و شوری بر ذرت در مرحله آخر رشدی می‌باشد. این مسله نشان می‌دهد که در مرحله چهارم رشدی که بخش آخر از مرحله رشد زایشی است و رسیدگی فیزیولوژیکی در آن اتفاق می‌افتد، اثر تنش‌های آبی و شوری در مراحل قبلی تبخیر و تعرق در این مرحله خود نمایی کرده و بیش‌ترین تأثیر را در این مرحله گذاشته است. جدول ۲ تجزیه واریانس عملکرد محصول و تبخیر و تعرق گیاه را در مراحل مختلف رشد نشان می‌دهد.

هر چه از تیمارهای W_0S_0 به تیمارهای W_2S_2 می‌رسیم با کاهش مقدار آب و پتانسیل آب در خاک و به تبع آن افزایش فشار اسمزی محلول خاک، کاهش جذب آب صورت گرفته که این کاهش منجر به کاهش مقدار تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تنشی آبی و شوری می‌شود. شکل ۲ مقدار ET ذرت را در تمامی ترکیبات تیماری

1- Maximum Error
2- Root Mean Square Error
3- Coefficient of Determination
4- Adjusted CD
5- Modeling Efficiency
6- Coefficient of Residual Mass

به تفکیک دوره‌های رشدی گیاه و برآورد آن تا سطح احتمال ۹۵٪ را نشان می‌دهد. جدول تجزیه واریانس تأثیر دو عامل تنش آبی و شوری و اثر متقابل آنها را در کاهش ET در تمامی مراحل رشدی گیاه با حداقل سطح احتمال ۹۵٪ را تائید می‌کند و فقط اثر متقابل تنش‌های آبی و شوری در مراحل توسعه و پایانی غیر معنی‌دار شده است که شاید به‌توان علّت آن‌را به شرایط تغذیه‌ای کامل گیاه در تمامی ترکیبات تیماری در پژوهش فوق دانست و فقط در مرحله میانی رشد مقادیر ET ترکیبات تیماری به‌صورت ضرب‌پذیر در شرایط توأمان تنشی بوده است (جدول ۲).





شکل ۱- تبخیر و تعرق واقعی و نسبی تیمارهای مورد بررسی در پژوهش حاضر

Figure 1- Absolute and relative evapotranspiration studied in the present study

جدول ۲- تجزیه واریانس تنش آبی، شوری و همزمان آن‌ها بر صفات مورد بررسی پژوهش (سال ۱۳۹۹)

Table 2- Analysis of variance of water, salinity and their simultaneity stresses on the studied traits (2020)

منبع تغییرات S.D.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares تبخیر و تعرق Evaporation and transpiration (mm) مرحله اوّلیه Initial stage	مرحله توسعه Development stage	مرحله میانی Middle stage	مرحله پایانی Final stage	عملکرد تر Wet yield (ton.hec^{-1})
بلوک Block	2	13.81*	1.06$^{n.s}$	19.61**	2.20$^{n.s}$	0.47*
تنش آبی Water stress	2	51.79**	32508.98**	30087.48**	11506.96**	290.21**
تنش شوری Salinity stress	2	0/80^{ns}	176.65**	567.76**	563.45**	39.11**
تنش شوری × تنش آبی Ws × Ss	4	0.06^{ns}	4.80^{ns}	7.32**	8.13$^{n.s}$	5.01**
خطا Error	16	2.47	1.92	1.38	5.03	0.12
ضریب تبیین R-Square	_	0.77	0.99	0.99	0.99	0.99
ضریب تغییرات[1] C.V	_	3.08	0.84	0.63	1.97	0.83

ns، ** و * به‌ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح خطای ۱و ۵ درصد

ns,** and *: non-significant, significant at p≤0.01 and p≤0.05 respectively

1- Coefficient of Variations

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش‌های آبی و شوری بر صفات مورد بررسی پژوهش (به روش آزمون توکی- سال ۱۳۹۹)

Table 3- Comparison of the average interaction effects of water and salinity stresses on the studied traits (by Tukey test method - 2020)

ترکیبات تیماری Treatment compounds	تبخیر - تعرق Evaporation and transpiration (mm)				عملکرد تر Wet yield (ton.hec⁻¹)
	مرحله اوّلیه Initial stage	مرحله توسعه Development stage	مرحله میانی Middle stage	مرحله پایانی Final stage	
W_0S_0	54.30 ᵃ	231.53 ᵃ	254.07 ᵃ	152.80 ᵃ	50.39 ᵃ
W_0S_1	53.57 ᵃ	227.53 ᵇ	248.13 ᵇ	145.93 ᵇ	46.71 ᵇ
W_0S_2	53.57 ᵃ	221.97 ᶜ	236.67 ᶜ	134.53 ᶜ	44.36 ᶜ
W_1S_0	50.10 ᵇ	166.63 ᵈ	190.93 ᵈ	130.43 ᵈ	41.41 ᵈ
W_1S_1	49.80 ᵇ	162.33 ᵉ	184.10 ᵉ	121.17 ᵉ	40.75 ᵉ
W_1S_2	49.87 ᵇ	156.03 ᶠ	173.77 ᶠ	115.00 ᶠ	40.16 ᶠ
W_2S_0	49.80 ᵇ	110.50 ᵍ	137.33 ᵍ	80.77 ᵍ	38.44 ᵍ
W_2S_1	49.30 ᵇ	106.30 ʰ	130.67 ʰ	75.50 ʰ	35.81 ʰ
W_2S_2	49.20 ᵇ	104.10 ʰ	124.5 ⁱ	67.07 ⁱ	33.23 ⁱ

بررسی مقایسه میانگین اثر متقابل تنش‌های آبی و شوری بر مقادیر ET مراحل چهارگانه رشدی گیاه حاکی از متفاوت بودن تأثیر سطوح مختلف تنشی دارد به‌طوریکه کمترین تفاوت بین مقادیر ET در مرحله ابتدای رشد و بیش‌ترین آن در دو مرحله توسعه و میانی مشاهده گردیده است (جدول ۳). بررسی تأثیر سطوح مختلف آبی و شوری آب آبیاری بر مقادیر ET در مراحل مختلف رشدی ذرت (شکل ۲) حکایت از بیش‌ترین درصد کاهشی ET در مرحله پایانی با متوسط درصد کاهش ۱۳/۶٪ و پس از آن در مرحله میانی با متوسط درصد کاهش ۸/۴٪ و سپس در مرحله توسعه رشد با متوسط درصد کاهش ۵/۴٪ و کم‌ترین آن به مقدار ۱٪ مربوط به مرحله ابتدای رشد بوده که هیچ‌گونه تنشی از لحاظ آبی و شوری نداشته است. بنابراین از طریق مدیریت کاهش تنش‌های فوق در مراحل حساس رشد گیاه ذرت می‌توان نقش به‌سزایی در افزایش ET گیاه و به تبع آن عملکرد محصول اقدام نمود. در پژوهشی اثر سه سطح شوری آب آبیاری (۲، ۴/۵ و ۷ dS/m) در اهواز بر مقدار تبخیر و تعرق کل دوره رشد ذرت (ET_t) نشان داد که مقدار ET نسبی در تیمارهای ۴/۵ و ۷ dS/m با کاهش به‌ترتیب ۱۲/۵ و ۲۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد (۲ dS/m) بوده است (Heidarinia *et al.*, 2016) افزایش غلظت املاح در خاک با به‌کار بردن آب‌های شور برای آبیاری باعث کاهش قابلیت جذب آب توسط گیاه و کاهش تبخیروتعرق و در نتیجه عملکرد محصول خواهد شد. در پژوهشی دیگر اثر تنش آبی در مراحل چهار برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه ذرت نشان از کاهش ET نسبی به‌ترتیب ۱۳/۲٪، ۳۰/۲٪، ۳۴/۱٪ و ۲۳/۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد خود بود (Saeidi and Sotoudeh Nia, 2021). در پژوهشی دو ساله در منطقه قزوین اثرات تیمارهای شوری و عنصر ازت در مراحل رشدی ذرت علوفه‌ای مطالعه شد. نتایج نشان داد که لزوم اطلاع از حساسیت گیاهی در مراحل مختلف رشدی به تبخیر و تعرق دوره‌ای نسبت به شرایط محیطی بسیار حائز اهمیت است (Saeidi *et al.*, 2021). از این رو میزان حساسیت متفاوت ذرت نسبت به انجام فرآیند تعرق در مراحل مختلف رشد، از علل کاهش متفاوت مقدار ET در دوره رشد کامل ذرت می‌باشد بنابراین با شناختن حساسیت مراحل رشدی ذرت و کاستن از تنش آبی گیاه در مراحل حساس رشد از طریق آبیاری کامل می‌توان کمک شایانی در مدیریت آبیاری و افزایش تعرق و در نهایت عملکرد محصول گردید.

تأثیر تیمارها بر عملکرد واقعی (ton/hec⁻¹) و عملکرد نسبی (٪)

نتایج عملکرد واقعی و نسبی پژوهش سال ۱۳۹۹ که در شکل ۳ نشان داده شده است، حاکی از تأثیر توأمان تنش‌های آبی و شوری به عملکرد محصول نسبت به تیمار شاهد (W_0S_0) است به‌طوری‌که میانگین عملکرد در تیمار W_2S_2 به ۳۳/۲۳ تن در هکتار رسید که یک کاهش ۳۴ درصدی را نسبت به شاهد نشان داد.

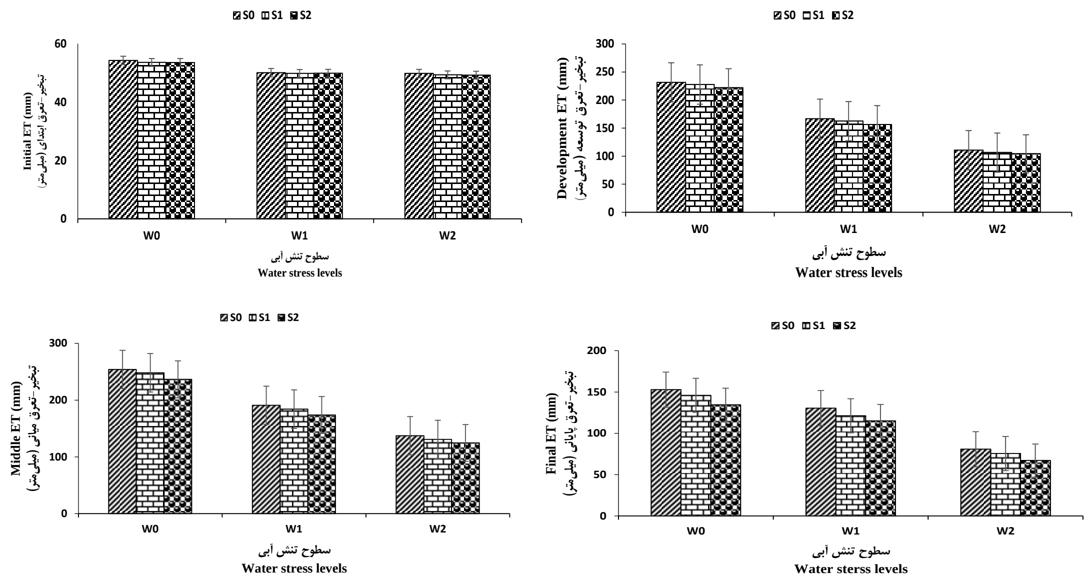
نتایج تجزیه واریانس حاکی از معنی‌دار بودن اثرات تنش آبی و شوری آب آبیاری در سطح احتمال ۹۹ درصد می‌باشد. (جدول ۲). افزایش تنش آبی و شوری موجب افزایش فشار اسمزی محلول خاک و کاهش پتانسیل آب در خاک گردیده که باعث کاهش جذب آب و تغرق گیاه شده و به تبع آن عملکرد ذرت کاهش یافته است. همچنین حاکی از مؤثر بودن اثر بلوک‌بندی طرح RCBD در سطح احتمال ۹۵ درصد، معنی‌دار بودن اثرات اصلی تنش آبی، شوری و اثرات متقابل این دو تنش در سطح احتمال ۹۹ درصد بود. تأثیر همزمان تنش‌ها بر عملکرد محصول به‌صورت ضرب‌پذیر بوده است به طوری‌که با افزایش تنش آبی و شوری، بیش‌ترین درصد کاهش عملکرد در گروه تیماری W_2 (تیمارهای W_2S_0، W_2S_1 و W_2S_2) با درصد کاهشی ۱۳/۶٪ نسبت به تیمار W_2S_0 و بعد از آن گروه تیماری W_0 (تیمارهای W_0S_0، W_0S_1 و W_0S_2) با درصد کاهشی ۱۲ درصد نسبت به تیمار W_0S_0 و در نهایت گروه تیماری W_1 (تیمارهای W_1S_0، W_1S_1 و W_1S_2) با درصد کاهشی ۳ درصد نسبت به تیمار

W_1S_0 در رتبه سوم قرار دارد. تنش‌های فوق به دلیل تأثیر بر کاهش جذب آب و تبخیر و تعرق گیاه موجب کاهش عملکرد تر بیولوژیکی محصول شده است. همچنین اعمال تنش‌ها در زمان‌های حساس رشد مانند ظهور گل‌های تاجی (نر) و پیدایش گل‌های ماده باعث اختلال در عمل گرده‌افشانی، عقیم شدن گیاه و مانعی در تشکیل دانه ذرت می‌شود. نتایج پژوهشی در شاهرود نشان داد که تنش آبی در مرحله گل‌دهی و دانه‌بندی به‌ترتیب بیش‌ترین و کمترین اثر را بر عملکرد بیولوژیکی ذرت دارد (Mohammadi Behmadi and Armin, 2017).

لذا با اعمال مدیریت آبیاری در مرحله گل‌دهی می‌توان از کاهش شدید عملکرد جلوگیری به عمل آورد. در پژوهشی دیگر اثر چهار سطح شوری آب آبیاری (۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ dS/m) بر عملکرد خشک ذرت (دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد) نشان از کاهش ۶، ۱۴ و ۲۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد (۰/۵ dS/m) دارد (Saeidi, 2021).

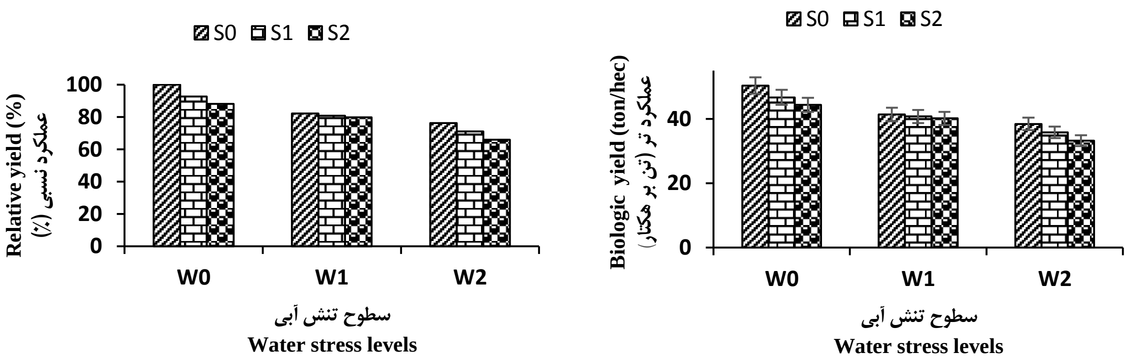
مدل‌سازی ضرایب رشدی ذرت به تنش آبی و شوری

با توجه به داده‌های پژوهش سال ۱۳۹۹ و استفاده از نرم‌افزار SPSS Ver. 26 ضرایب مراحل چهارگانه رشدی ذرت با توجه به تنش آبی و شوری اعمال شده برای تیمارهای مختلف تعیین و معادلات تجربی شش‌گانه مطرح شده در کلیات پژوهش آورده شده است.



شکل ۲- تأثیر سطوح تنش آبی و شوری بر تبخیر-تعرق واقعی ذرت در مراحل مختلف دوره رشدی گیاه

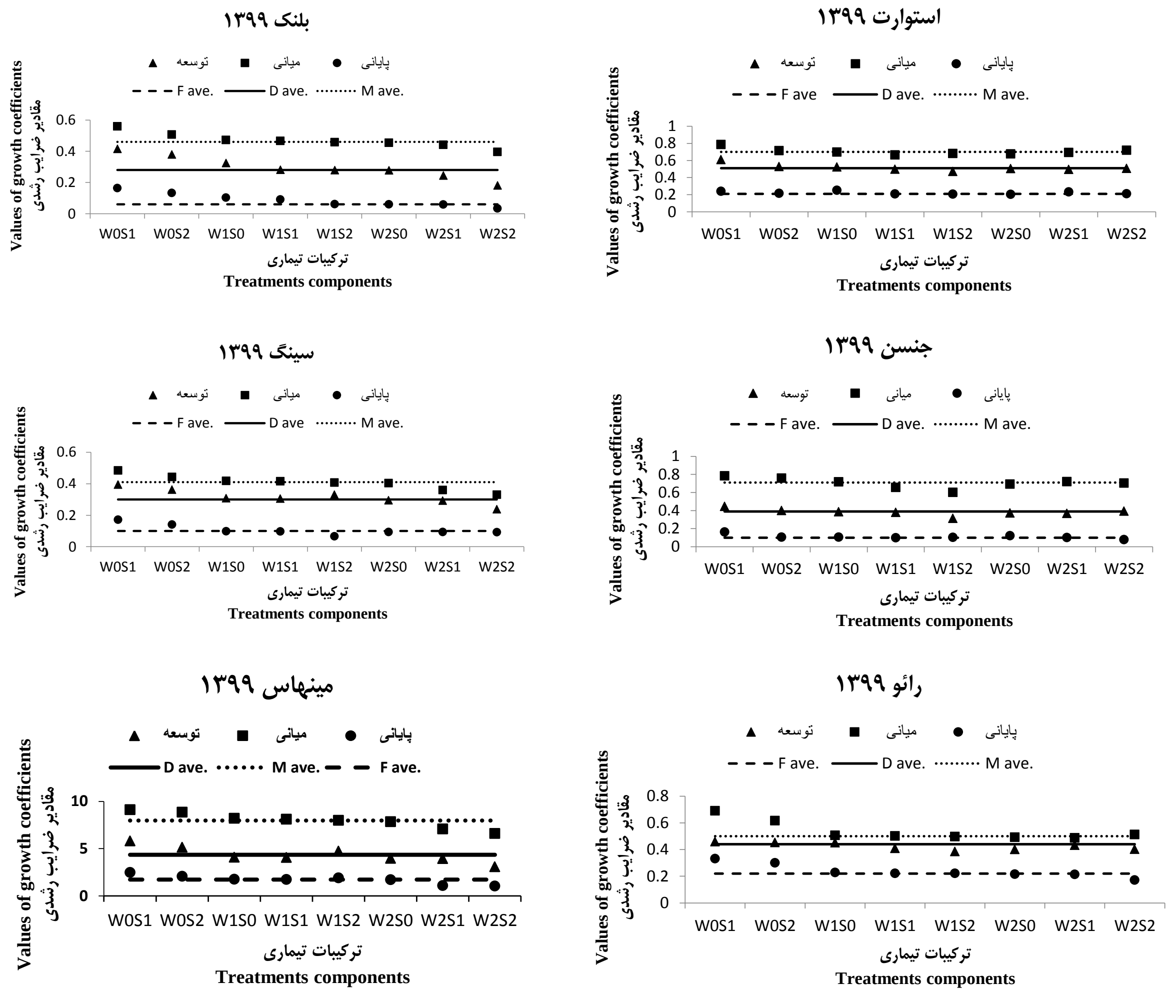
Figure 2- Effect of water stress and salinity levels on absolute evapotranspiration of maize at different stages of plant growth



شکل ۳- عملکرد واقعی و نسبی تر تیمارهای مورد بررسی در پژوهش حاضر

Figure 3- Absolute and relative wet yield of the treatments studied in the present study

در همه مدل‌ها، مقادیر ضرایب حساسیت به تنش در مراحل مختلف رشدی ذرت متفاوت بوده و این وضعیت به دلیل حساسیت متفاوت ذرت در طول فصل رشد می‌باشد. مقادیر ضرایب حساسیت در مدل‌های بِلَنک، اِستوارت، سینگ، جِنسِن، مینهاس و رائو به‌ترتیب در بازه‌های کمینه و بیشینه (۰/۱۰۶ تا ۰/۱۱۹)، (۰/۲۹۹ تا ۰/۳۳۶)، (۰/۱۲۵ تا ۰/۱۴۰)، (۰/۲۸۱ تا ۰/۳۱۶)، (۳/۰۰۱ تا ۳/۳۷۱) و (۰/۴۶۰ تا ۰/۵۱۸) در مرحله ابتدای یا اوّلیه رشد، (۰/۲۸۵ تا ۰/۳۱۹)، (۰/۴۹۵تا ۰/۵۵۷)، (۰/۳۰۳ تا ۰/۳۴۰)، (۰/۳۶۶ تا ۰/۴۱۲)، (۴/۱۶۵ تا ۴/۶۷۸)و (۰/۴۰۵ تا ۰/۴۵۵) در مرحله توسعه یا دوّم رشدی، (۰/۴۴۹ تا ۰/۵۰۴)، (۰/۶۷۴ تا ۰/۷۵۸)، (۰/۳۹۰ تا ۰/۴۳۸)، (۰/۶۷۳ تا ۰/۷۵۸)، (۷/۶۳۳ تا۸/۵۷۴) و (۰/۵۱۴ تا ۰/۵۷۸) درمرحله سوّم یا میانی رشد و بالاخره (۰/۰۸۴ تا ۰/۰۹۵)، (۰/۲۱۲ تا ۰/۲۳۹)، (۰/۱۰۳ تا ۰/۱۱۵)، (۰/۱۰۵ تا ۰/۱۱۸)، (۱/۶۵۴ تا ۱/۸۵۸) و (۰/۲۲۷ تا ۰/۲۵۶) در مرحله آخر یا پایانی رشد قرار داشتند. شکل ۴ به‌طور شهودی مقادیر پراگندگی ضرایب حساسیت در مراحل رشدی مختلف ذرت را نسبت به میانگین آن در تیمارهای مختلف از W_0S_1 تا W_2S_2 در مدل‌های شش‌گانه نشان می‌دهد. میانگین ضرایب حساسیت در مرحله ابتدای رشد در مدل‌های بِلَنک، اِستوارت، سینگ، جِنسِن، مینهاس و رائو به‌ترتیب عبارتند از ۰/۱۱۱، ۰/۳۱۲، ۰/۱۳۰، ۰/۲۹۴، 3/136 و ۰/۴۸۲ و در مرحله توسعه ۰/۲۹۶، ۰/۵۱۷، ۰/۳۱۶، ۰/۳۸۳، ۴/۳۵۲ و ۰/۴۲۴ و در مرحله میانی ۰/۴۶۹، ۰/۷۰۴، ۰/۴۰۷، ۰/۷۰۴، ۷/۹۷۶ و ۰/۵۳۸ و در مرحله پایانی ۰/۰۸۸، ۰/۲۲۲، ۰/۱۰۷، ۰/۱۱۰، ۱/۷۲۸ و ۰/۲۳۸ محاسبه و در نهایت در مدل‌های شش‌گانه تجربی در جدول ۴ وارد شدند.



شکل ٤- مقادیر ضرایب رشدی برآورد شده مدل‌ها در تیمارهای مختلف طرح

Figure 4- The amounts of estimated growth coefficients of models in the different treatments in plan

جدول ٤- معادلات تولید شده برای مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش براساس داده‌های سال ۱۳۹۹
Table 4- The equations generated for different models based on 2020 data

نام مدل Model name	معادله مدل Model equation
بلنک (Blank)	$\frac{Y_s}{Y_m}=0.111\left(\frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}}\right)+0.297\left(\frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}}\right)+0.469\left(\frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}}\right)+0.088\left(\frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}}\right)$
استوارت (Stewart)	$\frac{Y_s}{Y_m}=1-\left[0.312\left(1-\frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}}\right)+0.517\left(1-\frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}}\right)+0.704\left(1-\frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}}\right)+0.222\left(1-\frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}}\right)\right]$
سینگ (Singh)	$\frac{Y_s}{Y_m}=0.130\left[1-\left(1-\frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}}\right)^2\right]+0.316\left[1-\left(1-\frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}}\right)^2\right]+0.407\left[1-\left(1-\frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}}\right)^2\right]+0.107\left[1-\left(1-\frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}}\right)^2\right]$
جنسن (Jensen)	$\frac{Y_s}{Y_m}=\left(\frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}}\right)^{0.294}\times\left(\frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}}\right)^{0.383}\times\left(\frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}}\right)^{0.704}\times\left(\frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}}\right)^{0.110}$
رائو (Rao)	$\frac{Y_s}{Y_m}=\left[1-0.482\left(1-\frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}}\right)\right]\times\left[1-0.424\left(1-\frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}}\right)\right]\times\left[1-0.538\left(1-\frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}}\right)\right]\times\left[1-0.238\left(1-\frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}}\right)\right]$
مینهاس (Minhas)	$\frac{Y_s}{Y_m}=\left[1-\left(1-\frac{ET_{S_1}}{ET_{m_1}}\right)^2\right]^{3.136}\times\left[1-\left(1-\frac{ET_{S_2}}{ET_{m_2}}\right)^2\right]^{4.352}\times\left[1-\left(1-\frac{ET_{S_3}}{ET_{m_3}}\right)^2\right]^{7.976}\times\left[1-\left(1-\frac{ET_{S_4}}{ET_{m_4}}\right)^2\right]^{1.728}$

هر مرحله‌ای از رشد ذرت که نسبت به تیمارهای تنش حساس‌تر باشد مقدار ضریب حساسیت در آن مرحله بیشتر خواهد بود. تأثیر افزایش تنش‌ها بر کاهش مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد محصول در مرحله حساس رشد گیاه بیشتر از دیگر مراحل است. نتایج مدل‌های تجربی نشان داد که در تمام مدل‌ها به غیر از مینهاس، به‌ترتیب مراحل حساس رشد عبارتند از میانی، توسعه و پایانی و در مدل مینهاس مرحله توسعه مقدم بر مرحله میانی در شرایط تنش همزمان آبی و شوری صورت گرفته است. از آن‌جایی که در تمامی مدل‌ها دو مرحله رشدی توسعه و میانی از حساسیت بیش‌تری نسبت به تنش آبی و شوری برخوردار هستند از این رو اعمال تنش‌های مذکور در این مراحل بیش‌ترین تأثیر بر تبخیر-تعرق و عملکرد محصول را خواهد داشت و تنها مدل جِنسِن ویژگی یک‌نواختی بیش‌تری نسبت به مقادیر ضرایب حساسیت به تنش در کُل تیمارهای تحت تنش آبی و شوری را نشان داده است (بر اساس محاسبات انحراف از میانگین مقادیر ضرایب رشدی). در پژوهشی مشابه این ویژگی یک‌نواختی توسط مدل بِلَنک شناخته شده بود (Hemati *et al.*, 2014).

تأیید و ارزیابی مدل‌ها

با استفاده از داده‌های تبخیر-تعرق واقعی طی چهار مرحله دوره رشدی ذرت در منطقه مطالعاتی، عملکرد نسبی با مدل‌های شش‌گانه تعیین گردید. مقادیر واقعی و مدل‌سازی شده عملکرد نسبی در شکل ۵ با یک‌دیگر مقایسه و قابلیت مدل‌ها در برآورد عملکرد نسبی نشان داده شده است. جهت اعتبار سنجی قابلیت مدل‌ها در برآورد عملکرد نسبی از آماره‌های ارزیابی EF، R^2، R^2_{adj}، RMSE، ME و CRM که برای تأیید کارکرد مدل‌ها به‌کار می‌رود استفاده گردید. در جدول ۵ پارامترهای آماری تحلیل حساسیت مدل‌های تجربی و نظری متداول در علوم خاک و آب با یک‌دیگر مقایسه و نسبت به رتبه‌بندی مدل‌ها اقدام شد. همانطوری که قبلاً در بخش معرفی مدل‌های کاربردی گفته شد معیار استاندارد برای انتخاب مدل بهینه، نزدیک بودن مقادیر EF، R^2 و R^2_{adj} به یک و نزدیک بودن مقادیر RMSE، ME و CRM به صفر می‌باشد. در سه مدل جمع‌پذیر مطرح شده در پژوهش فوق مدل سینگ با ارزیابی‌های آماری EF، R^2، R^2_{adj}، RMSE، ME و CRM به‌ترتیب ۰/۳۶۱، ۰/۸۹۱، ۰/۸۷۳، ۰/۰۶۵، ۰/۰۸۷ و ۰/۰۷۲- به‌عنوان مدل بهینه انتخاب گردید و در سه مدل ضرب‌پذیر جِنسِن، مینهاس و رائو، مدل رائو با آنالیزهای ذکر شده ۳/۱۷۱-، ۰/۹۱۴، ۰/۹۰۰، ۰/۱۶۵، ۰/۲۶۳ و ۰/۱۶ به‌عنوان مدل برتر تشخیص داده شد و مدل مینهاس با EF و R^2 به‌ترتیب ۴۱/۱۰۳- و ۰/۸۴۳ به‌عنوان تنها مدل نامناسب در پژوهش فوق مشخص شد. آماره RMSE میانگین انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل می‌باشد و هرچه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. کم‌ترین

مقدار برای ME و RMSE صفر می‌باشد و مقدار زیاد ME نمایانگر بدترین حالت برآورد مدل است. پارامتر EF بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین می‌باشد و مقدار آن همیشه بین ۱+ تا ∞ متغیر است و هرچه مقدار آن به واحد نزدیک‌تر باشد مدل کاراتر است. CRM نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش برآوردی یا کم برآوردی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است. تحلیل آماره CRM نشان داد که تمامی مدل‌های به غیر از سینگ کم‌تر از میزان حقیقی (واقعی) عملکرد تر نسبی را در شرایط تنش همزمان آبی و شوری برآورد کرده است. فاکتور کارآیی مدل‌سازی نشان داد که در شرایط تنش‌های گفته شده مدل‌های سینگ، بِلَنک، رائو، جِنسِن، استوارت، و مینهاس به‌ترتیب دارای اولویت‌بندی بوده و در شکل ۵ درستی این رتبه‌بندی قابل مشاهده است. لذا براساس نتایج گرفته شده، عملکرد نسبی تر ذرت تحت شرایط تنش آبی و شوری با استفاده از مدل بهینه (سینگ) قابل برآورد است و در صورت تغییر مقدار تنش‌های آبی و شوری (مدیریت تنش) در مراحل مختلف رشدی ذرت امکان تخمین عملکرد تر نسبی براساس مقدار تبخیر-تعرق نسبی وجود خواهد داشت. در تحقیقی مشابه در قزوین با خاک لوم شنی مدل بهینه اِستوارت و جِنسِن با کارآیی به‌ترتیب ۰/۹۹۴ و ۰/۹۹۲ تشخیص داده شد (Hemati *et al.*, 2014). در نواحی خشک چین پژوهشی در ارتباط با اثرات تنش خشکی (با ۱۵ تیمار) در مقایسه با تیمار شاهد (تأمین ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه) جهت انتخاب بذر رقم مناسب ذرت در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و پر شدن دانه‌ها صورت گرفت و نتایج نشان داد که از میان مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر گفته شده تنها مدل رائو با ضرایب رشدی ۰/۷۷۲، ۰/۳۴۳ و ۰/۹۱۶ به‌ترتیب در مراحل رشدی توسعه، میانی و پایانی بهترین مدل برای انتخاب بذر مناسب در شرایط کم آبی می‌باشد و مرحله گل‌دهی مهم‌ترین مرحله از سیکل طبیعی رشد ذرت می‌باشد که نباید هیچ‌گونه تنشی در این مرحله داده شود و در غیر این صورت شاهد کاهش معنی‌داری در عملکرد نسبت به تیمار شاهد می‌باشیم (Shi et al., 2020).

نتیجه‌گیری

بر اساس نشریه آبیاری و زهکشی فائو ۵۶، کل مقادیر تبخیر-تعرق گیاه به چهار مرحله رشدی (ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی) تقسیم می‌شود، بر این اساس عملکرد واقعی و نسبی ذرت علوفه‌ای SC.704 نسبت به سطوح مختلف تنش آبی و شوری در منطقه مطالعاتی بررسی گردید. مقادیر تبخیر و تعرق در مراحل چهارگانه رشد تیمار شاهد (W_0S_0) که هیچ‌گونه تنشی اعمال نگردید به‌ترتیب عبارت بودند از ۵۴/۳، ۲۳۱/۵، ۲۵۴/۱ و ۱۵۲/۸ میلی‌متر که معادل ۷/۸، ۳۳/۴، ۳۶/۷ و ۲۲/۱ درصد کل تبخیر-تعرق تیمار شاهد است و متوسط تبخیر و تعرق در مرحله اوّلیه تمامی تیمارهای مورد بررسی (۹ تیمار) ۵۱/۱ میلی‌متر که برابر ۷/۴٪ تبخیر-تعرق تیمار شاهد محاسبه شد. در بقیه تیمارها از W_0S_1 تا بیشینه تنش‌ها (W_2S_2) مقدار تبخیر-تعرق بین ۹۸/۳ تا ۴۵/۰ درصد در مرحله توسعه، ۹۷/۶ تا ۴۹/۰ درصد در مرحله میانی و ۹۵/۵ تا ۴۳/۹ درصد در مرحله پایانی برآورد گردید که این مقادیر به ترتیب برابر با متوسط کاهش ۲/۵ (W_0S_1)، ۶/۶ (W_0S_2)، ۲۲/۳ (W_1S_0)، ۲۵/۳ (W_1S_1)، ۲۸/۶ (W_1S_2)، ۴۵/۴ (W_2S_0)، ۴۷/۸ (W_2S_1) و ۵۰/۲ (W_2S_2) درصدی نسبت به کل تبخیر-تعرق تیمار شاهد اصلی (W_0S_0) می‌باشد.

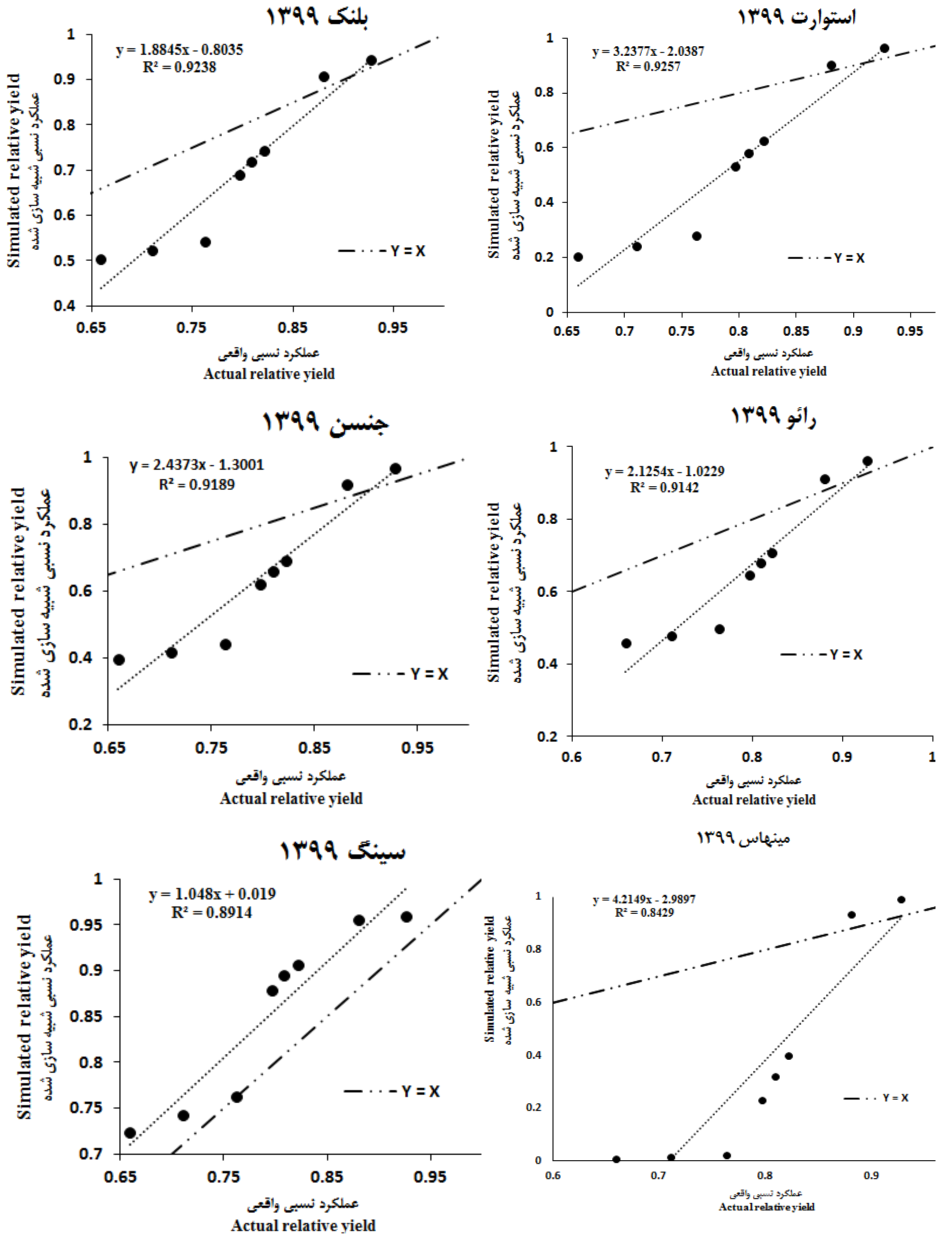
جدول ۵- پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار مدل‌ها در سال ۱۳۹۹

Table 5- Statistical Parameters for evaluating the validity of models in 2020

مدل Model	ME	RMSE	R^2	R^2_{adj}	EF	CRM
بلنک (Blank)	0.219(2)	0.130(2)	0.924(2)	0.911(2)	-1.591(2)	0.125(2)
استوارت (Stewart)	0.487(5)	0.323(5)	0.926(1)	0.913(1)	-15.020(5)	0.323(5)
سینگ (Singh)	0.087(1)	0.065(1)	0.891(5)	0.873(5)	0.361(1)	-0.072(1)
جنسن Jensen)(	0.319(4)	0.203(4)	0.919(3)	0.905(3)	-5.322(4)	0.196(4)
رائو (Rao)	0.263(3)	0.165(3)	0.914(4)	0.900(4)	-3.171(3)	0.160(3)
مینهاس (Minhas)	0.739(6)	0.524(6)	0.843(6)	0.817(6)	-41.103(6)	0.541(6)

توضیح: شماره بالانویس شده روی هر عدد بیانگر اولویت انتخاب مدل بر اساس شاخص‌های آماری است.

Explanation: The superscripted numbers in brackets indicate the priority of choosing a model based on statistical indices.



شکل ۵- مقایسه توان انواع مدل‌ها در برآورد عملکرد نسبی ذرت تحت شرایط تنش هم‌زمان آبی و شوری

Figure 5- The comparison of the potential of model types in estimating relative maize yield under simultaneous water and salinity stress

همچنین عملکرد ذرت از ۵۰/۴ تن در هکتار در شرایط بدون تنشی با ۳۴/۰ درصد کاهش به ۳۳/۲ تن بر هکتار در تیمار W_2S_2رسیده است.

همان‌طوری که نتایج نشان داد تاثیر تنش آبی و شوری بر تبخیر و تعرق و عملکرد ذرت حداقل در سطح احتمال ۹۵ درصدی معنی‌دار بوده است و با بیشتر شدن تنش‌های گفته شده مقدار تبخیر و تعرق و عملکرد با شیب بیشتری کاهش می‌یابد و علاوه بر تاثیر تنش، حساسیت مراحل رشدی گیاه بر کاهش میزان تبخیر-تعرق موثر می‌باشد به این شکل که در مرحله پایانی با متوسط کاهش ۱۳/۶ درصدی در سه گروه تیماری W_0، W_1 و W_2 بیش‌ترین کاهش و بعد از آن با متوسط کاهش ۸/۴ درصدی در مرحله میانی در رتبه دوم قرار دارد. بنابراین در این دو مرحله رشدی به دلیل شروع آغاز گل‌دهی، تشکیل میوه و رسیدگی فیزیولوژیکی دانه بیش‌ترین کاهش شیب تبخیر-تعرق مشاهده شده است. دلایل این نتایج می‌تواند از نبود

ذخیره آب کافی و افزایش شوری آب آبیاری در خاک باشد. تنش‌های آبی و شوری به دلیل کاهش مقدار و پتانسیل آب موجود در خاک، باعث کاهش جذب آب و تبخیر-تعرق و نهایتاً کاهش تولید محصول خواهد شد و از دیگر نتایج به‌دست آمده از پژوهش می‌توان به اولویت اوّل تنش آبی نسبت به تنش شوری در کاهش تبخیر و تعرق و عملکرد تولید اشاره کرد. همچنین با مدیریت تنش‌های آبی و شوری در مراحل حساس رشد گیاه (خصوصاً مرحله میانی) که زمان گل‌دهی و آغاز شروع و تکمیل فرآیند تولید بلال می‌باشد، می‌توان از کاهش چشمگیر تولید کاست. بعلاوه در این تحقیق مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر برای مدل‌سازی روابط بین عملکرد و تبخیر-تعرق در طول دوره رشدی ذرت (حدود ۱۳۰ تا ۱۴۰ روز) استفاده گردید و نتایج اعتبار سنجی نشان داد که سه مدل سینگ، بِلَنک، رائو به ترتیب رتبه‌های اول تا سوم را در تخمین عملکرد نسبی تر در شرایط تنشی دوگانه آبی و شوری دارد. بنابراین نتایج نشان داد که نه تنها در شرایط تنش شوری با مدیریت مصرف آب در مراحل حساس رشدی می‌توان تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت را افزایش داد بلکه در مورد تغییر میزان تنش‌های آبی و شوری در مراحل رشد، برآورد عملکرد نسبی ذرت بر اساس مقدار تبخیر و تعرق نسبی ممکن خواهد بود. کم کردن یک نوبت آبیاری (شش نوبت به‌جای هفت نوبت آبیاری) به‌ترتیب در مراحل جوانه‌زنی، به ساقه رفتن، پیدایش گل نر، پیدایش گل ماده، تشکیل دانه و شیری شدن دانه باعث کاهش حجم آب آبیاری خواهد شد.

منابع

1-Azizian, A., & Sepaskhah, A.R. (2014). Maize response to water, salinity and nitrogen levels: yield-water relation, water-use efficiency and water uptake reduction function. *International Journal of Plant Production 8*(2): 183-214. https://doi.org/10.22069/IJPP.2014.1524.

2- Abdoli, A.,Nikpour, M., Hosseini, Y., & Ramezani Moghadam, J. (2018). Evaluation the effects of the irrigation water salinity and water stress on yield components of cherry tomato. *Journal of Water and Soil 32*(3): 489-500. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JSW.V3213.70395.

3- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation Drainage Paper No. 56: 1-326.

4- Blank, H. (1975). *Optimal irrigation decisions with limited water*. Ph. D. dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.

5- Doorenbos, J., & Pruitt, W.O. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. Food and agriculture organization (FAO) of the United Nations, irrigation and drainage paper No. 24. Room, Italy.

6- Heidarinia, M., Naseri, A., Boroomandnasab, S., & AlbaJi, M. (2016). The effect of irrigation with saline water on evapotranspiration and water use Eefficiency of maize under different crop management. *Irrigation Science and Engineering 40*(11): 99-110. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22055/JSW.2017.12960.

7-Hemati R., Maghsoudi, K., & Emam, Y. (2014). Morpho-physiological responses of maize to drought stress at different growth stages in northern semi-arid region of Fars . *JCPP 4*(11) :67-75. (In Persian with English abstract)

8- Jalali, V.R., Homaee, M., & Mirnia, S.KH. (1999). Modeling canola response to salinity in productive growth stages. *Journal of Water and Soil Science 12*(44): 111-121. (In Persian with English abstract)

9- Jensen, M.E. (1968). *Water consumption by agricultural plants*. In: T. T. Kozlowski (ed), Water deficits in plant growth. (pp. 1-22). Academic Press, New York. NY. https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/742.

10- Lacerda, C.F., Ferreira, J.F.S., Liu, X., & Suarez, D.L. (2016). Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science 202*(2016): 192-202. https://doi.org/10.1111/jac.12145.

11- Minhas, B.S., Parikh, K.S., & Srinivasan, T.N. (1974). Toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. *Journal of Water Resources Research 10*(3): 383-393. https://doi.org/10.1029/WR010i003p00383.

12- Mohammadi Behmadi, M., & Armin, M. (2017). Effect of drought stress on yield and yield components of different corn cultivars in delayed planting conditions. *Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology 4*(1): 17-34. (In Persian)

13- Nicoullaud, B., King, D., & Tardieu, F. (1994). Vertical distribution of maize root in relation to permanent soil characteristics. *Plant Soil* 159: 245-254.

14- Rao, N.H., Sarma, P.B.S., & Chander, S. (1988). A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agriculture Water Management 13*(1): 25-32. https://doi.org/10.1016/0378-3774(88)90130-8.

15- Saeidi, R. (2021). Effect of drought and salinity stress on estimation of forage maize yield through periodic evapotranspiration using different model. *Journal of Water Research in Agriculture 35*(2): 107-121. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/jwra.2021.355044.876.

16- Saeidi, R., Sotoodehnia, A., Ramezani Etedali, H., Kaviani, A., & Nazari, B. (2018). Study of effect of water salinity and soil fertility stresses on evapotranspiration of Maize. *Iranian Journal of Soil and Water Research 49*(4):

945-954. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.247876.667815.
17- Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., Kaviani, A., & Nazari, B. (2021). Salinity and fertility stresses modify Ks and readily available water coefficients in maize (case study: Qazvin region). *Irrigation Science 39*(3): 299-313. https://doi.org/10.1007/s00271-020-00711-1.
18- Saeidi, R., & Sotoodehnia, A. (2021). Yield reaction to evapotranspiration of maize, under the effect of water stress at different growth stages (In Qazvin Plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research 52*(3): 611-620. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijswr. 2021.314850.668822.
19- Stewart, J., Hagan, R., & Pruitt, W. (1976). *Production functions and predicted irrigation programmers for principal crops as required for water resources planning and increased water use efficiency*. Final Report. Department of Interior, Washington, D.C.
20- Sing. P., Wolkewits, H., & Kumar, R. (1987). Comparative performance of different crop production functions for wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Irrigation Science 8*(4): 273-290.
21- Shi, R., Tong, L., Du, T., & Shukla, M.K. (2020). Response and modeling of hybrid maize seed vigor to water deficit at different growth stages. *Journal of Water 12*(11): 3289. https://doi.org/10.3390/w12113289.
22- Unlukara, A., Kurunc, A., Duygu-Kesmez, G., Yurtseven, E., & Suarez, D.L. (2010). Effect of salinity on eggplant (*Solanum melongena*) growth and evapotranspiration. *Irrigation and Drainage* 59: 203-214. https://doi.org/10.1002/ird.453.
23- Unlukara, A., Kurunc, A., Kesmez, G., & Yurtseven, E. (2008). Growth and evapotranspiration of Orka as influenced by salinity of irrigation water. *Irrigation and Drainage Engineering* 2: 160-166. http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(160).
24- Xin, H., Peiling, Y., Shumei, R., Yankai, L., Guangyu, J., & Lianhao, L. (2016). Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation. *Journal of Agriculture and Biology Engineering 9*(2): 63-73. http://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160902.1683.